

# 海洋绞车钢丝绳缠绕过程动力学分析

黄良沛\*,寇煜,常进杰

(1.湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;  
2.湖南科技大学 先进矿山装备教育部工程研究中心,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**针对电驱动海洋绞车钢丝绳缠绕系统,研究钢丝绳在缠绕过程中的动力学特性.运用弹性振动理论建立提升钢丝绳的数学模型,并对柔性钢丝绳建模参数进行了详细计算,利用 Solidworks 和 Adams 建立了钢丝绳缠绕系统的虚拟样机模型并对其进行了仿真分析.结果表明,在绞车提升、下放过程中,波浪对钢丝绳张力有一定程度的影响,加速度的变化对钢丝绳动张力影响明显,尤其在加速度突变节点与层间过渡段,会对钢丝绳缠绕系统造成较大冲击,加剧磨损的发生;同时进一步分析验证了同层缠绕时钢丝绳张力的衰减现象与卷筒接触力的变化规律.这些结果为海洋绞车提升系统设计与优化有着重要的参考价值.

**关键词:**海洋绞车;Adams;钢丝绳缠绕系统;动张力

**中图分类号:**TH218 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)02-0070-09

## Dynamic Analysis of Wire Rope Winding Process of Marine Winch

Huang Liangpei, Kou Yu, Chang Jinjie

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment, Ministry of Education,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Aimed at the wire rope winding system of electric drive marine winch, the dynamic characteristics of wire rope during winding process are studied. The mathematical model of the reinforced wire rope is established by the elastic vibration theory. There is a detailed calculation on the modeling parameters of the flexible wire rope model. Based on Solidworks and Adams, the virtual prototype model of the wire rope winding system is established and simulated. Results show that the wave motion has a certain degree of influence on the tension of the steel wire rope during the lifting and lowering process of the winch the dynamic tension of the steel wire rope is closely relevant to the change of the acceleration, especially acceleration abrupt node and inter-layer transition section. It will cause great impact on the wire rope winding system and aggravate the occurrence of wear. Moreover, the study has a further analysis and verification about the variation of the tension of the wire rope and the contact force of the reel when the same layer is wound. These results are of valuable references for the design and optimization of marine winch lifting system.

**Keywords:** marine winch; Adams; wire rope winding system; dynamic tension

海洋绞车是科学考察和深海资源勘测开发的重要提升设备,广泛适用于水下拖曳系统、ROV 系统等作业平台.随着各行业对资源的迫切需求,陆地资源已不能满足发展所需,由于海洋资源存储量巨大,其开

收稿日期:2019-02-26

\*通信作者,E-mail: lphuang@hnust.edu.cn

发利用已成为人类发展的重要方向<sup>[1]</sup>.海洋绞车在深海作业中,因其恶劣的作业环境,外界干扰损耗绞车较大的作业精度,影响绞车缠绕提升系统的性能.为提高绞车整机性能,优化设备的动力学特性尤为关键.由于海洋开采实地取样及回收数据过程中伴随着成本过高、周期过长等问题,现阶段,多以虚拟样机仿真结合提升试验台获取所需数据,以便进一步对海洋绞车缠绕提升系统进行动力学研究.

对于海洋绞车提升系统,交流变频电机通过控制卷筒的转动,配合排缆系统的运作使得钢丝绳有序地进行缠绕或释放.钢丝绳缠绕过程受到负载、电机转速及转向的影响,其缠绕状态会出现一系列变化,甚至会导致钢丝绳挤压、咬绳等现象,严重影响设备安全与人员安全.在海洋绞车提升试验中发现,钢丝绳与卷筒表面均出现了不同程度的损伤,因而对钢丝绳缠绕过程进行动力学研究是非常有必要的.

本文以电驱动海洋绞车为研究对象,利用 Adams 建立海洋绞车钢丝绳缠绕系统的虚拟样机模型,分析钢丝绳在缠绕过程中的动力学问题.考虑到钢丝绳的动张力及寿命因素,进行了动载系数的验证,在此基础上进一步分析了钢丝绳的动张力与卷筒的接触力问题,为海洋绞车钢丝绳缠绕系统设计提供了理论依据与指导.

## 1 海洋绞车钢丝绳缠绕系统动力学计算

### 1.1 海洋绞车运行速度图

对于本文所涉及的提升设备而言,其速度图多为典型的三阶段、五阶段以及六阶段提升速度图<sup>[2]</sup>.海洋绞车属于深海作业设备,由于作业环境特殊,提升过程中需要多次匀速提升,由于匀速时段时间过长,难以在虚拟样机仿真中实现,因此在保证提升最大速度、加速度不变的情况下对速度图进行简化,如图 1 所示,对应各提升阶段的具体参数如表 1 所示.

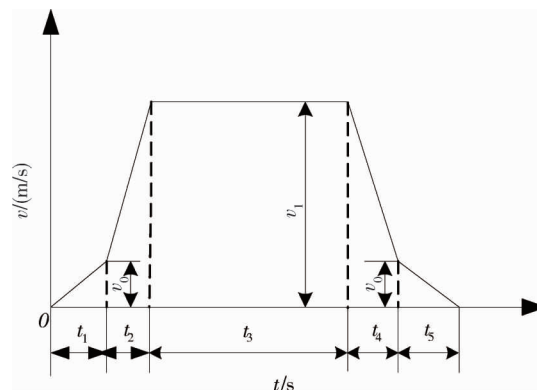


图 1 简化后的五阶段速度

表 1 海洋绞车简化后对应各阶段提升时间、速度以及加速度

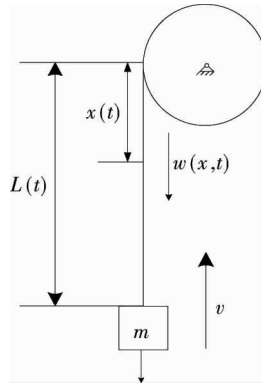
提升阶段	提升时间/s	起始速度/(m/s)	结束速度/(m/s)	提升加速度/(m/s <sup>2</sup> )
$t_1$	4.00	0.00	0.50	0.125
$t_2$	1.17	0.50	1.67	1.000
$t_3$	15.00	1.67	1.67	0.000
$t_4$	1.17	1.67	0.50	-1.000
$t_5$	4.00	0.50	0.00	-0.125

### 1.2 钢丝绳缠绕提升数学模型

钢丝绳属于柔性体,其张力在缠绕过程中将受到不同提升加速度、负载质量、绳长等一些外部因素影响<sup>[3]</sup>.为便于研究,做出以下简化<sup>[4]</sup>:(1)忽略钢丝绳的横向振动;(1)忽略钢丝绳的弯曲、扭转刚度;(3)忽略系统阻尼以及摩擦力.钢丝绳缠绕提升系统的简化物理模型如图 2.

在提升过程中,钢丝绳绳长  $L(t)$  随时间变化,钢丝绳  $x(t)$  处的纵向振动为  $w(x, t)$ ,只考虑钢丝绳纵向位移,即

$$v = L'(t). \quad (1)$$



$L(t)$ -绳长函数; $x(t)$ -位置函数; $w(x,t)$ -纵向振动位移函数; $v$ -提升速度

图2 钢丝绳缠绕提升模型

边界条件为

$$w(0,t) = \frac{\partial w(0,t)}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

系统动能可表示为

$$E_k = \frac{1}{2}m(v + \frac{\partial w}{\partial t})^2 \Big|_{x=L(t)} + \frac{1}{2}\rho \int_0^{L(t)} (v + \frac{\partial w}{\partial t})^2 dx. \quad (3)$$

式中: $m$ 为负载质量; $\rho$ 为钢丝绳密度.

系统势能为

$$E_p = \int_0^{L(t)} \left[ F(x,t) \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{2}EA \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] dx. \quad (4)$$

式中: $F(x,t)$ 为钢丝绳张力; $E$ 为钢丝绳弹性模量; $A$ 为钢丝绳横截面积.

利用 Hamilton 原理:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(E_k - E_p) dt = 0. \quad (5)$$

边界条件:

$$\begin{cases} \delta w(x, t_1) = \delta w(x, t_2) = 0; \\ \delta w(0, t) = \delta w(L(t), t) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

推导出钢丝绳的纵向振动方程为

$$\begin{cases} \rho(v' + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}) - \frac{\partial F(x,t)}{\partial x} - EA \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, 0 < x < L(t); \\ m(v' + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}) + \rho v(v + \frac{\partial w}{\partial t}) + F(x,t) + EA \frac{\partial w}{\partial x} = 0, x = L(t). \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为偏微分方程,常规数值求解困难,最终采用 Galerkin 方法,将其转化为常微分方程,利用 Simulink 求解得出钢丝绳张力的动力响应.

海洋绞车在海上作业时,外部载荷主要由波浪激励与流体粘滞曳力组成.在波浪作用下,海洋绞车会随船舶作升沉运动,对钢丝绳张力会有较大的影响,本文将波浪作用简化为规则波,作为船舶的外部激励进行研究.船舶的升沉位移可表示为

$$s(t) = \frac{\mu H}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right). \quad (8)$$

式中: $\mu$ 为船舶垂直位移与浪高的比值(一般取值小于0.5); $H$ 为浪高, $m$ ;  $T$ 为波浪周期, $s$ .现设定绞车作业海况等级为四级,即浪高  $H$  有效值为 1.25~2.50 m,周期  $T$  为 4.7~5.8 s.

流体粘滞曳力产生于绞车提升、下放过程中,负载会受到来自海水粘滞效应产生的拖曳力影响,作用

力可表示为

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = -\frac{\rho_h}{2} \begin{bmatrix} C_x S_x |\dot{x}| \dot{x} \\ C_y S_y |\dot{y}| \dot{y} \\ C_z S_z |\dot{z}| \dot{z} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $F_x, F_y, F_z$  为负载在  $x, y, z$  方向上产生的拖曳力, N;  $C_x, C_y, C_z$  为  $x, y, z$  方向上的拖曳力系数;  $S_x, S_y, S_z$  为负载在  $x, y, z$  方向运动时的投影面积,  $m^2$ ;  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$  为负载在  $x, y, z$  方向上的运动速度,  $m/s$ ;  $\rho_h$  为海水密度,  $kg/m^3$ .

## 2 海洋绞车钢丝绳缠绕系统虚拟样机的建立

### 2.1 钢丝绳仿真模型的建立

由文献<sup>[5-7]</sup>可知钢丝绳仿真模型的建立,主要有 3 种建模方法:轴套力建模法、有限元离散柔性体法、Polyline 法.考虑到有限元离散法不适用于大长度、大变形的钢丝绳仿真;Polyline 法只是模拟钢丝绳的运动形态,未考虑钢丝绳的力学性能;轴套力法能更真实的模型钢丝绳的动态特性,更适合研究钢丝绳的缠绕和振动行为.故选用轴套力法对钢丝绳建立仿真模型.

#### 2.1.1 轴套力参数的确定

轴套力法建模是将一条连续的钢丝绳离散成多个圆柱微段,在相邻圆柱微段间施加轴套力,通过定义力与力矩的 6 个分量来实现圆柱微段间的柔性连接.两圆柱微段间的受力模型如图 3 所示,

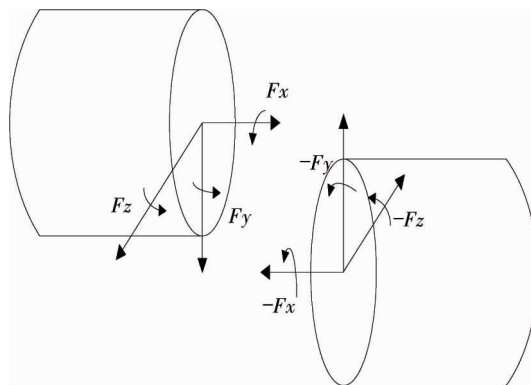


图 3 轴套力

轴套力计算公式<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \\ T_{x0} \\ T_{y0} \\ T_{z0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $[r_x \ r_y \ r_z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T, [v_x \ v_y \ v_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  为相邻圆柱微段间的位移矩阵、速度矩阵;  $T_x, T_y, T_z$  为在  $x, y, z$  方向上的力矩大小;  $\mathbf{K}, \mathbf{C}$  分别为刚度系数矩阵、阻尼系数矩阵.

由式(10)可看出,轴套力的大小取决于相邻圆柱微段间的位移与速度,为了更好地模拟出钢丝绳的力学性能,需要对其中的刚度系数和阻尼系数进行设定,设定参数由下式<sup>[9]</sup>确定:

$$\begin{cases} K_{11} = EA/L; \\ K_{22} = K_{33} = GA/L; \\ K_{44} = G\pi R^4/2L; \\ K_{55} = K_{66} = E\pi R^4/4L. \end{cases} \quad (11)$$

式中： $E$  为钢丝绳弹性模量，取  $E = 1.4 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ； $G$  为钢丝绳的剪切模量，取  $G = 80 \text{ GPa}$ ； $A, R, L$  分别为钢丝绳微段的横截面积、半径和长度。

由文献<sup>[10]</sup>可知阻尼系数设定在  $1 \sim 10 \text{ N} \cdot \text{s/mm}$  时，能更加反映出钢丝绳的实际性能，本文选用  $C_{11} = C_{22} = C_{33} = 1 \text{ N} \cdot \text{s/mm}$ ， $C_{44} = C_{55} = C_{66} = 10 \text{ N} \cdot \text{s/mm}$ 。

### 2.1.2 接触参数的确定

海洋绞车钢丝绳缠绕系统运转过程中，钢丝绳与卷筒、天轮发生接触挤压，会产生相应的磨损<sup>[11]</sup>。Adams/View 中提供 2 种计算接触力的方法，补偿法和冲击函数法<sup>[12]</sup>。由于补偿法要确定惩罚系数与补偿系数，且需要选用辅助的拉格朗日扩张法来防止出现计算问题不能收敛，因此选用冲击函数法 (Impact)。

对钢丝绳与卷筒、天轮间添加接触力约束，需要定义接触刚度系数、碰撞指数、阻尼系数以及切入深度 4 个参数。接触力的定义形式<sup>[13]</sup>为

$$F_{\text{impact}} = \begin{cases} 0, & x > 0; \\ K_j x^e + \text{STEP}(x, 0, 0, d_{\text{max}}, c_{\text{max}}) \dot{x}, & \dot{x} \leq 0. \end{cases} \quad (12)$$

式中： $K_j$  为接触刚度系数； $x, \dot{x}$  为两接触物体的穿透深度与穿透速度； $e$  为非线性碰撞指数； $d_{\text{max}}$  为最大切入深度； $c_{\text{max}}$  为最大阻尼系数；STEP() 为 Adams 中的阶跃函数。

接触刚度系数为

$$K_j = \frac{4}{3} R^{\frac{1}{2}} E^* \quad (13)$$

式中： $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ ， $R_1, R_2$  为两接触物体的当量半径； $\frac{1}{E^*} = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}$ ， $E_1, E_2$  分别为两接触物体的弹性模量； $v_1, v_2$  为两接触物体的泊松比。

接触阻尼系数为

$$c = \frac{3K(1-n^2)}{4v_p} x^e \quad (14)$$

式中： $n$  为弹性恢复系数； $v_p$  为圆柱面接触碰撞速度。

经过计算，选取的接触力参数如下：接触刚度为  $1.5 \times 10^4 \text{ N/m}$ ，非线性指数为 1.5，最大阻尼系数通常设定为刚度系数的 0.1%~1.0%，切入深度为取默认值 0.1<sup>[14]</sup>。

## 2.2 虚拟样机模型的建成

在确定好钢丝绳建模参数后，利用 Adams 的二次开发宏命令实现连续钢丝绳的建立。建立好的刚性系统模型，在 Adams 中与钢丝绳进行约束与驱动的添加，完成虚拟样机模型建立，最终建立模型如图 4 和图 5。

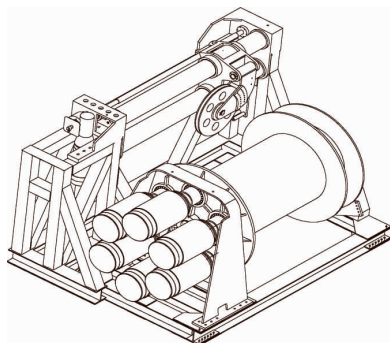


图 4 海洋绞车三维模型

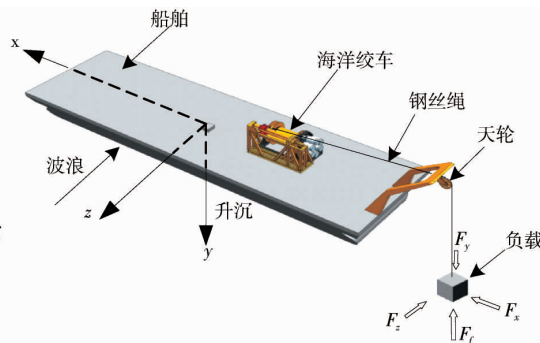


图 5 海洋绞车虚拟样机模型

### 3 仿真结果分析

由图 1 可知,提升、下放过程: $t_1$  主加速阶段; $t_2$  加速阶段; $t_3$  匀速阶段; $t_4$  为减速阶段; $t_5$  为减速至停止阶段.整个过程为 25.34 s,设置仿真时间为 26 s,步长为 2 600.钢丝绳缠绕过程虚拟样机的主要参数如表 2.

表 2 钢丝绳缠绕过程虚拟样机仿真的主要参数

变量名称	数值	变量名称	数值
有效提升高度/m	30	最大提升速度/(m/s)	1.670
负载质量/kg	10 000	最大提升加速度/(m/s <sup>2</sup> )	1.000
钢丝绳直径/mm	32	钢丝绳密度/(kg/m)	2.353
卷筒直径/mm	1 600	钢丝绳最大静张力/kN	245.000

#### 3.1 提升动载荷分析

由图 6 和图 7 可知,负载在提升过程中,在提升加速阶段动载荷波动明显,在减速阶段波动很小;受波浪影响的提升动载荷比未受影响的提升动载荷波动要大.在提升动力效应的影响下以及波浪激励的外部作用,使得提升动载荷出现了一定程度的激增.

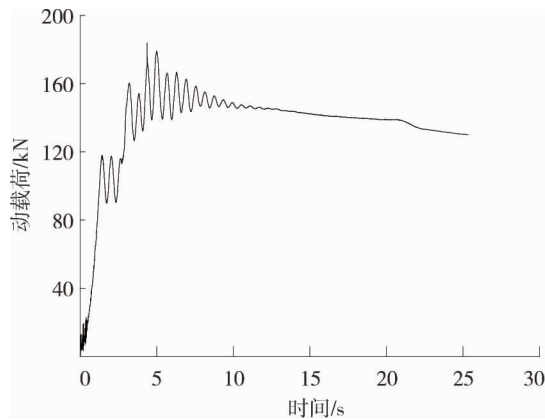


图 6 提升动载荷

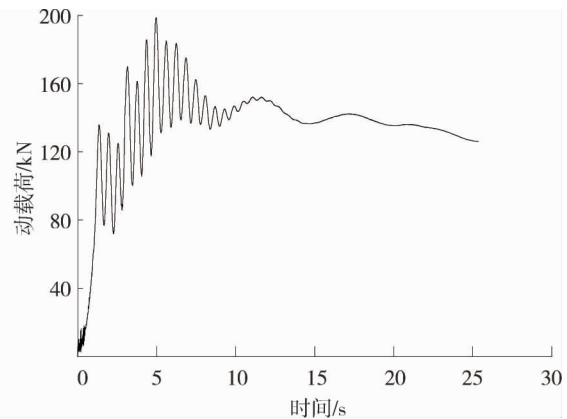


图 7 受波浪影响的提升动载荷

负载质量为  $1.0 \times 10^4$  kg,由图 7 可以看出:动载荷最大峰值点为  $1.98 \times 10^5$  N,则对应的提升动载系数<sup>[15]</sup>为

$$\varphi = \frac{P_t}{p} = 2.02. \quad (15)$$

式中: $p$  为提升负载; $p_t$  为提升动载荷.

提升动载系数影响到钢丝绳的使用寿命,一般提升动载系数不超过 2,由式 15 计算结果可以看出,钢丝绳已经到达了安全使用极限.

#### 3.2 钢丝绳动张力分析

由图 8 和图 9 仿真结果可知,动张力均呈周期波动衰减状态;动张力最大波幅与最小波幅出现在加速与匀速阶段;加速至匀速、匀速至减速节点,动张力突变明显;波浪对动张力影响明显.加速时产生的柔性冲击在阻尼作用下逐渐减小,因而增加匀速时间有利于平稳提升,加速度的突变造成负载惯性冲击是张力发生突变的重要原因.

由图 10 和图 11 可知,在匀速与减速阶段,波浪对动张力影响较大;加速度突变节点,张力发生突变;钢丝绳张力的最大峰值出现在下放初始时刻.由于 Adams 在仿真初始,负载做自由落体运动,对钢丝绳造成惯性冲击,出现张力峰值,因而此阶段仿真结果存在一定误差.对比整个提升、下放过程发现,波浪激励对负载提升影响更大;加速度突变节点对提升、下放动张力均出现较大影响,动张力的冲击会加剧磨损的

发生,对钢丝绳寿命以及提升电机产生不利影响,应尽量避免.

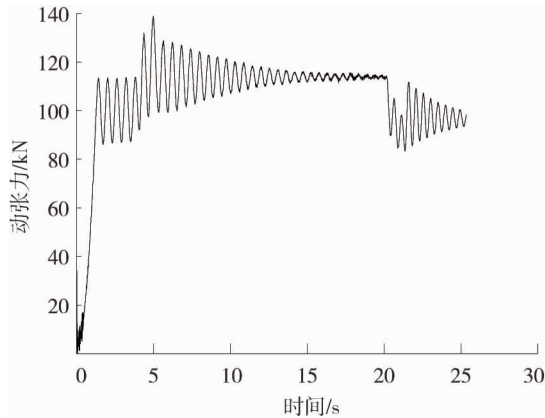


图8 提升动张力

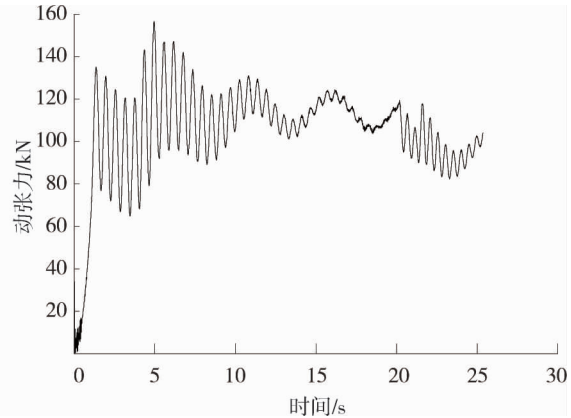


图9 受波浪影响的提升动张力

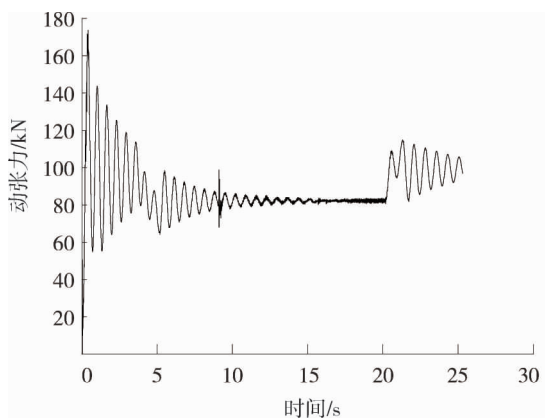


图10 下放动张力

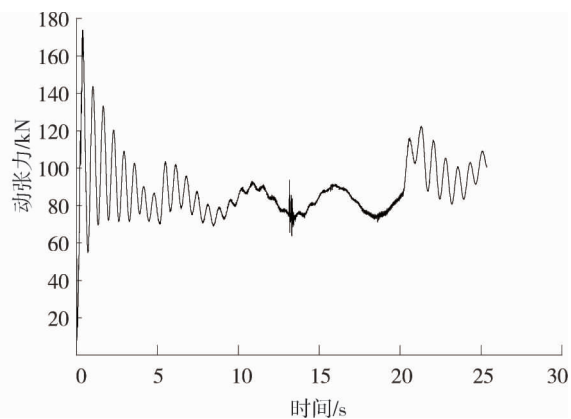


图11 受波浪影响的下放动张力

表3和表4中列出了提升、下放各阶段钢丝绳平均动张力的仿真值与理论值.由表中数据可以看出提升加速阶段、下放减速阶段仿真值与理论值误差较大,由于数值模型忽略了系统阻尼与摩擦,在加速度突变情况下,计算结果不够准确.而匀速阶段,系统运行趋于平稳,仿真模型的弹性形变减小,仿真值与理论值接近.

表3 缠绕提升过程各阶段的平均动张力

提升阶段	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
仿真平均值/kN	101.22	118.71	116.07	90.83	92.68
理论平均值/kN	105.73	127.24	118.66	95.79	98.75
误差/%	4.45	7.18	2.23	5.46	6.54

表4 缠绕下过程各阶段的平均动张力

下放阶段	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
仿真平均值/kN	92.17	80.91	82.95	102.13	98.89
理论平均值/kN	95.39	77.52	85.79	111.64	106.75
误差/%	3.49	4.37	3.42	9.31	7.94

### 3.2.1 缠绕过程张力衰减分析

对钢丝绳缠绕过程进行进一步研究,对比图12与图13可知,在8.3 s后,在缠绕圈数增加与接触摩擦影响下,出现能量耗散,致使图12张力波动迅速减小.图13张力值最终稳定在95 kN,图12张力值最终稳定在88 kN,张力衰减幅度为7.36%.由于钢丝绳与卷筒的径向挤压接触致使卷筒半径减小,造成初始缠绕的钢丝绳缠绕半径、弹性模量随之减小,进而使得后缠绕进的钢丝绳继续弹性变形,引起初始缠绕钢丝绳的轴向张力减小,出现钢丝绳张力衰减现象<sup>[16]</sup>.

### 3.2.2 钢丝绳层间过渡分析

对比图14和图15可以看出,动张力变化趋势与加速度变化趋势保持一致.图14在匀速段12.17 s钢丝绳发生层间过渡,钢丝绳张力波动幅值、频率均出现轻微增大.层间过渡前,钢丝绳张力为101 kN,过渡瞬间张力为107 kN,增大幅度5.94%.层间过渡时发生绳间接触,过渡瞬间产生形变造成绳间发生滑移,可

见层间过渡时是发生绳间磨损的主要阶段,由于采用的是钢丝绳离散模型,且绳间接触复杂,因此仿真结果存在一定偏差<sup>[17]</sup>.

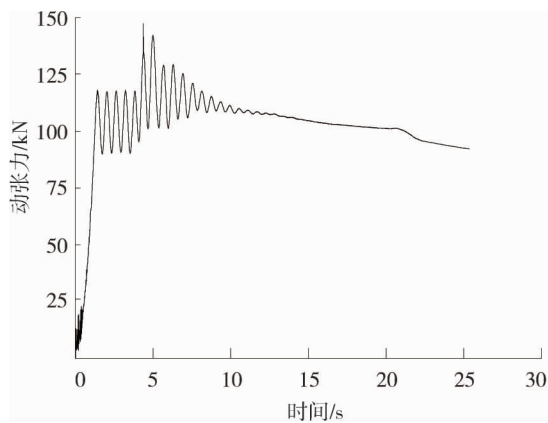


图 12 第 1 段钢丝绳张力

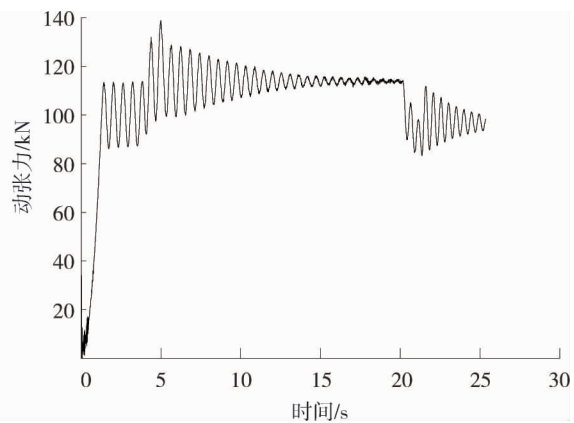


图 13 第 300 段钢丝绳张力

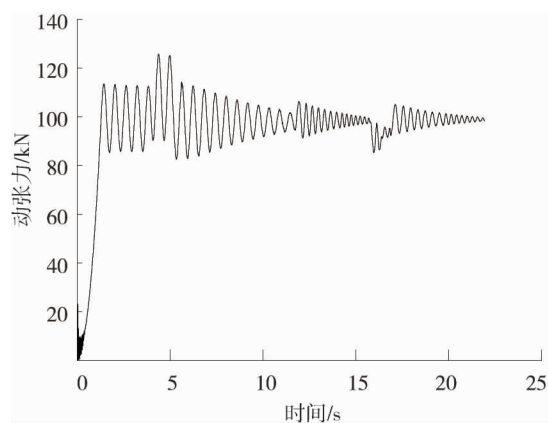


图 14 层间过渡时钢丝绳的张力

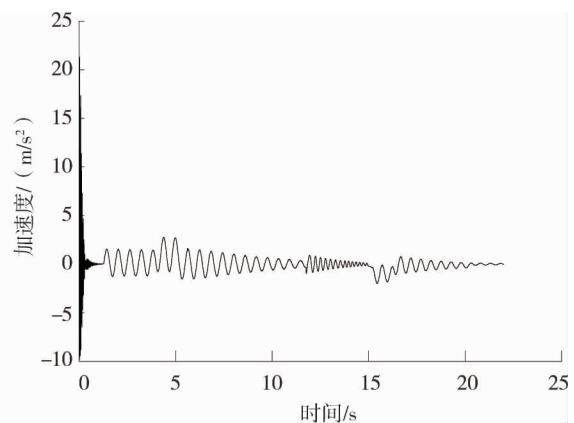


图 15 层间过渡时负载的加速度

### 3.3 钢丝绳与卷筒的接触力分析

由图 16 可知,在提升过程中,初始加速阶段接触力最大,接触力在接触瞬间由 0 开始发生接触冲击,随后周期减小;接触力峰值发生在加速阶段,同动张力一致.由图 17 可知,下放过程随着钢丝绳缠绕圈数的减少,卷筒挤压变形减小,钢丝绳轴向张力逐渐增大,接触力也呈周期增大趋势;对比图 16 与图 17 可知,钢丝绳缠绕提升、下放过程,接触力变化趋势相反;提升过程接触力更大;波浪激励对接触力的影响不大;接触力最大的阶段分别为提升加速段与下放减速段,此阶段加速度变化造成的冲击应加以重视.

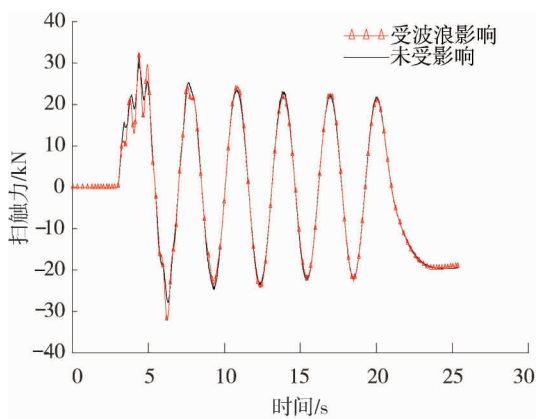


图 16 提升过程卷筒接触力

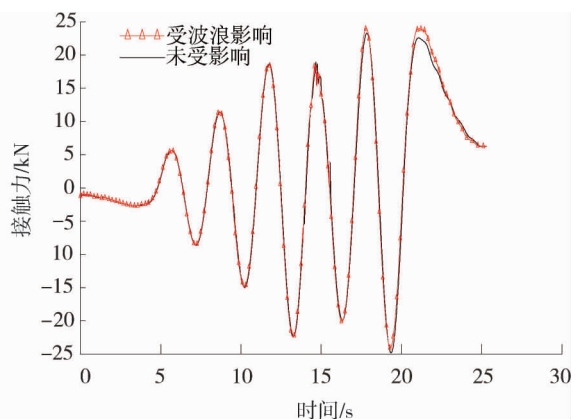


图 17 下放过程卷筒接触力



## 4 结论

1) 绞车提升、下放过程仿真发现,钢丝绳动张力波动呈周期衰减趋势;波浪对提升加速段、下放减速段影响更大;加速度突变节点对动张力影响尤为明显,此节点造成的冲击会加剧磨损,影响提升系统的稳定性.

2) 随着提升过程的继续,会造成初始缠绕钢丝绳发生张力衰减;钢丝绳进行层间过渡时,对动张力以及负载加速度产生影响,造成绳间磨损.

3) 卷筒接触力峰值出现在提升加速、下放减速段且均呈现周期变化,同钢丝绳动张力变化规律相吻合;波浪对接触力的影响不大,提升段接触力更大,因而提升过程更易发生卷筒磨损.以上所得结果对海洋绞车后期的设计与优化有重要的参考依据.

### 参考文献:

- [1] 曹忠祥.我国海洋战略资源开发现状及利用前景[J].中国经贸导刊,2012(6):38-39.
- [2] 黄良沛,陈磊,邹东升.海洋绞车提升系统动力学仿真分析[J].机械研究与应用,2018(1):4-8.
- [3] 王增才,聂志峰,邵海燕.多绳提升钢丝绳动态张力监测研究[J].仪器仪表学报,2004(3):402-405.
- [4] 张鹏,朱昌明,张梁娟.任意变长度柔性提升系统纵向振动分析与能量变化[J].上海交通大学学报,2008,42(3):480-483.
- [5] Andrew S E. Efficient Modeling of Extensible Cables and Pulley Systems in Adams[C]//In Europe Adams Conference, 2002.
- [6] 王定贤,殷亮,李颖,等.钢丝绳的建模及动力学仿真分析[J].矿山机械,2010(8):20-23.
- [7] 刘华伟.基于虚拟样机技术的矿井提升系统研究[D].太原:太原科技大学,2012.
- [8] 周炜,易建军,郑建荣.ADAMS 软件中绳索类物体的一种建模方法[J].现代制造工程,2004(5):38-39.
- [9] 方子帆,吴建华.钢丝绳类索结构模型的动力学仿真研究[J].起重运输机械,2009(2):71-75.
- [10] 金启华.基于虚拟样机的岸边集装箱起重机若干动力学研究[D].上海:华东理工大学,2003.
- [11] Guo Y, Zhang D, Chen K, et al. Longitudinal Dynamic Characteristics of Steel Wire Rope in a Friction Hoisting System and its Coupling Effect with Friction Transmission[J]. Tribology International,2018:731-743.
- [12] 高一佳.ADAMS 中的接触和接触摩擦作用机制实例详解[J].汽车实用技术,2017(6):64-66.
- [13] Imanishi E, Nanjo T, Kobayashi T. Dynamic Simulation of Wire Rope with Contact[J].Journal of Mechanical Science & Technology,2009,23(4):1083-1088.
- [14] 李增刚.ADAMS 入门详解与实例[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [15] 张青,张瑞军.工程起重机结构与设计[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [16] 颜竞峰.大型起重机钢丝绳缠绕系统的仿真与分析[D].南京:东南大学,2017.
- [17] 李晓光,龚宪生,吴水源,等.超深矿井提升机多层缠绕钢丝绳圈间过渡对钢丝绳动张力的影响研究[J].振动与冲击,2017(19):258-262.